JESK J Ergon Soc Korea 2026; 45(2): 71-77
https://dx.doi.org/10.5143/JESK.2026.45.2.71
https://jesk.or.kr eISSN:2093-8462

Effect of Customized Insoles on Plantar Pressure Distribution and Contact Area for Semiconductor FAB Standing Workers

Su In Park[1], Kyung Jun Kang[2], Jae Hee Park[1]

[1]Department of Social Safety Systems Engineering, Hankyong National University, Anseong, 17579
[2]Department of Chemistry, Korea Advanced Institute of Science and Technology, Daejeon, 34141

반도체 FAB 입식 작업자의 족저압 분산 및 접촉 면적 개선을 위한 맞춤형 인솔 적용 효과

박수인[1], 강경준[2], 박재희[1]

[1]한경국립대학교 사회안전시스템공학부
[2]한국과학기술원 화학과

Corresponding Author
Jae Hee Park
Department of Social Safety Systems Engineering, Hankyong National University, Anseong, 17579
Email : maro@hknu.ac.kr

Received : January 26, 2026
Revised : March 03, 2026
Accepted : March 08, 2026

Copyright@2026 by The Human Factors & Ergonomics Society of Korea. All right reserved.

Objective: This study aims to address the ergonomic issues associated with dustproof safety shoes, which are mandatory in semiconductor fabrication (FAB) cleanrooms.

Background: Unlike general work shoes, dustproof safety shoes typically possess hard outsoles and thin insoles, causing high plantar pressure and physical fatigue for equipment maintenance (PM) workers engaged in prolonged standing tasks. Therefore, this study investigates the biomechanical effects of applying customized insoles, designed to reflect the worker's foot arch, on plantar pressure distribution and contact area.

Method: Thirty skilled semiconductor maintenance workers reporting lower limb pain (NRS score ≥ 7) were selected for the study. Using the Pedar-X system, plantar pressure and contact area were measured in a static standing posture under two conditions: wearing standard dustproof safety shoes (Control) and wearing the shoes with customized insoles (Experimental). A paired *t*-test was conducted to analyze the statistical significance of the differences after verifying the normality of the data.

Results: The results indicated that the total contact area increased by approximately 15.2% when wearing customized insoles compared to the control condition. Notably, the contact area in the medial arch region, which is unsupported in standard safety shoes, increased by 65.5%, demonstrating a more even distribution of body weight across the foot. Consequently, peak plantar pressure in the forefoot and hindfoot regions significantly decreased ($p < 0.05$), confirming an improvement in the overall balance of foot pressure distribution.

Conclusion: This study quantitatively verified that applying customized insoles in a semiconductor FAB environment effectively increases the plantar contact area and disperses localized pressure. These findings suggest that customized insoles can serve as a practical intervention to reduce foot fatigue and prevent musculoskeletal disorders among semiconductor standing workers.

Application: These results can be utilized as foundational data for musculoskeletal

disorder prevention programs in industries requiring cleanroom safety shoes, such as semiconductor and display manufacturing.

Keywords: Semiconductor fabrication (FAB), Semiconductor worker, Customized insoles, Dustproof safety shoes, Foot pressure

1. Introduction

최근 4차 산업혁명의 가속화와 AI 기술의 발전으로 인해 반도체 산업은 국가 핵심 기간산업으로 자리 잡았다. 반도체 제조 공정의 고도화에 따라 설비의 유지보수(Preventive Maintenance, PM)를 담당하는 전문 인력의 역할이 중요해지고 있으나, 이들의 작업 환경에 대한 인간공학적 관심은 상대적으로 부족한 실정이다. 반도체 FAB (Fabrication) 내 청정지역(cleanroom)에서 근무하는 작업자들은 미세 먼지 제어를 위해 안전보건 가이드라인에 따라(KOSHA, 2023) 방진복과 방진화를 착용하며, 업무의 대부분을 정적 기립 자세(static standing posture) 혹은 제한된 공간에서의 입식 자세로 수행한다. 장시간의 입식 작업은 하지 부종, 요통, 그리고 족저근막염과 같은 근골격계질환(Work-related Musculoskeletal Disorders, WMSDs)을 유발하는 주요 위험 요인으로 보고되고 있다(Baek and Jeon, 2021; Kim and Jin, 2023; Park et al., 2021). 특히 작업자와 중량물, 혹은 작업 환경 간의 부적절한 인터페이스는 신체적 부하를 가중시키며, 이는 작업 효율 저하와 산업재해로 이어질 가능성이 높다(Lin and Chan, 2007; Kim and Choi, 2021).

일반적인 산업 현장과 달리 반도체 FAB 바닥은 공기 순환을 위한 Grating 혹은 Access Floor 형태의 딱딱한 재질로 구성되어 있어 보행 및 기립 시 충격 흡수가 어렵다. 더욱이 필수적으로 착용해야 하는 안전 방진화는 정전기 방지 기능에 초점을 맞추어 제작되었기 때문에, 일반 운동화나 러닝화에 비해 밑창(outsole)이 딱딱하고 중창(midsole)의 쿠션 기능이 현저히 낮다. 선행 연구에 따르면 신발의 굽 높이와 쿠션감은 신체 균형 및 족저압 분포에 직접적인 영향을 미치며(Oh et al., 2009), 딱딱한 신발 내부에서의 장시간 작업은 족저의 특정 부위에 과도한 압력을 집중시켜 피로도를 증가시킨다(Ryu et al., 2008). NIOSH (1981) 가이드라인에서도 작업 자세와 바닥의 조건이 허리 및 하지 부하에 미치는 영향을 강조한 바 있다.

이러한 족부 질환 예방을 위해 기능성 인솔에 관한 연구가 다각도로 진행되어 왔다. 인솔은 발과 신발 사이의 접촉 면적을 넓혀 체중 부하를 분산시키고, 하지 근육의 활성도를 조절하여 피로를 경감시키는 효과가 있다(Park, 2010; Lee et al., 2010). 최근에는 족저압 불균형을 인식하고 교정하기 위한 압력 매트 연구(Park et al., 2024)나 스마트 인솔의 유효성 검증 연구(Kang et al., 2022) 등 IT 기술을 접목한 시도가 이어지고 있다. 그러나 기존 연구들은 대부분 보행이나 일반적인 작업 환경을 대상으로 하고 있으며, 반도체 FAB이라는 특수 환경과 '방진화'라는 제한된 신발 조건을 고려한 연구는 미비하다. 방진화는 내부 공간이 협소하고 통기성이 부족하여 시중의 기성 인솔을 적용하기 어려우며, 작업자의 발 아치(arch) 특성을 고려하지 않은 일률적인 인솔 적용은 오히려 불편감을 초래할 수 있다.

이에 본 연구는 반도체 설비 유지보수 작업을 수행하는 입식 작업자를 대상으로, 개인별 족부 형상을 반영한 맞춤형 인솔을 적용하였을 때 나타나는 생체역학적 변화를 규명하고자 한다. 구체적으로는 맞춤형 인솔 적용 전후의 족저 접촉 면적(contact area)과 족저압(plantar pressure)의 변화를 정량적으로 분석함으로써, 반도체 산업 현장 내 근골격계질환 예방을 위한 인간공학적 효과를 검증하는 것을 목적으로 한다.

2. Method

2.1 Subject

본 연구는 국내 반도체 제조 기업 내에서 설비 유지보수(PM) 업무를 담당하는 남성 작업자 30명을 대상으로 수행되었다. 연구 대상자는 하루 평균 6시간 이상 방진화를 착용하고 입식 작업을 수행하는 경력 5년 이상의 숙련된 인력으로, 최근 6개월 이내에 하지 근골격계 통증(NRS 7점 이상)을 호소한 자로 선정하였다. 하지 수술 이력이 있거나 보행에 병리학적 문제가 있는 자는 제외하였다. 선정된 대상자의 평균 연령은 34세(±2.5), 평균 신장은 174cm(±3.2), 평균 체중은 77kg(±4.5)이었다. 본 실험은 임직원 건강증진프로그램으로

전원 자발적 참여자이며 반도체 사업상 기밀 특약과 IRB 요구사항인 연구계획서에 준하는 연구 목적 및 절차를 투명하게 충분히 설명하였고 모든 대상자도 비임상시험인 만큼 신체 위험성 및 안전 확보에 이상 없음을 명확히 확인하고 자발적 서면 동의를 하였다.

2.2 Experimental equipment

족저압 측정에는 신뢰도가 검증된 Pedar-X system (Novel GmbH, Munich, Germany)을 사용하였다. 해당 장비는 99개의 정전용량식 센서(capacitive sensor)가 내장된 인솔 타입의 측정기로, 신발 내에서 발생하는 수직 압력을 정밀하게 측정할 수 있다(Kang et al., 2022). Sampling rate는 50Hz로 설정하였다(Figure 1 and Table 1).

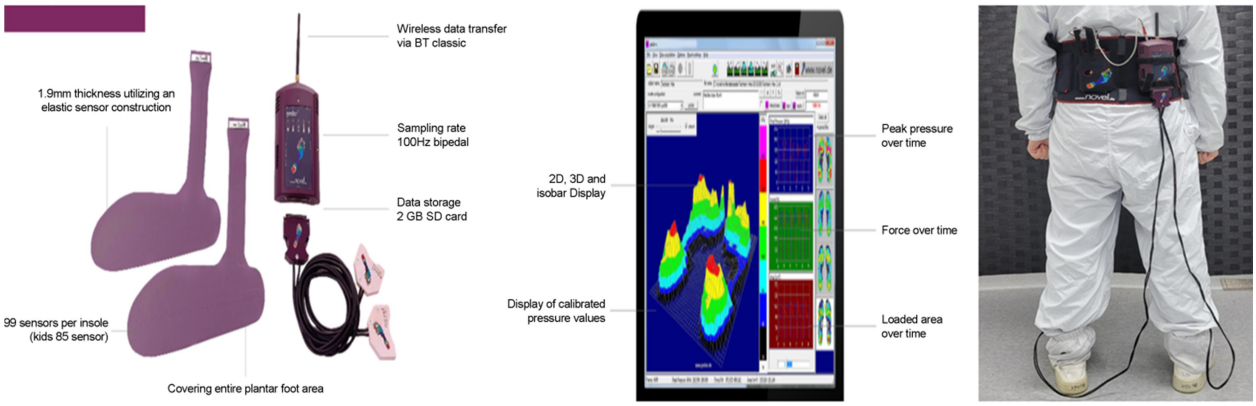
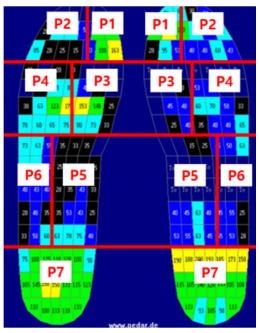


Figure 1. Novel (Germany) Pedar-X system (insole precision pressure measuring instrument)

Table 1. Foot pressure classification

Variables	7 Detailed positions
P1	Hallux
P2	Other parts including toes
P3	Inside of the fore foot
P4	Outside of the fore foot
P5	Inside of the middle foot
P6	Outside of the middle foot
P7	Rear foot



실험에 사용된 맞춤형 인솔은 대상자 개개인의 발 형상을 정밀하게 반영하기 위해 임프레션 폼을 사용하여 족형을 채취한 후 제작되었다(Figure 2). 이는 기존의 평평한 방진화 재질 폴리우레탄 일체형 깔창과 달리, 바이오폼 재질의 맞춤형 인솔은 족궁(arch)을 지지하고 뒤꿈치(heel)를 감싸는 컵(cup) 형태로 설계되어 발의 안정성을 높이도록 고안되었다. 산업현장에서 방진화는 650g의 방진화와 805g의 방진화가 사용될 수 있는데, 본 실험에서는 반도체 현장에서 통상적으로 지급되는 정전기 방지용 안전화(무게 805g)를 사용하였다(Figure 3).

Figure 2. Custom insoles impression foam (bio foam)

Figure 3. General dustproofing (665g) and safety shoes dustproofing (805g) weight comparison

2.3 Experimental procedure

실험은 반도체 FAB과 유사한 환경 조건을 갖춘 실험실에서 진행되었다. 측정 오차를 최소화하기 위해 실험 전 장비의 영점 조절을 실시하였다. 대상자는 동일한 방진복을 착용한 상태에서 다음 두 가지 조건, 첫 번째 통제 조건(control)은 기존 일체형 인솔 적용 안전 방진화와, 두 번째 실험 조건(experimental)은 기존 안전 방진화에 추가 맞춤형 인솔을 착장하여 비교 측정을 수행하였다.

측정 자세는 양발을 어깨너비로 벌리고 시선은 정면을 향하는 정적 기립 자세(static standing posture)를 유지하도록 하였다. 각 조건당 30초간 대기 후 안정된 상태에서 10초간의 데이터를 수집하였으며, 총 3회 반복 측정하여 평균값을 분석에 사용하였다.

2.4 Data analysis

수집된 데이터는 SPSS Statistics (Ver 26.0, IBM, USA)를 이용하여 분석하였다. 종속 변수는 접촉 면적(contact area, cm^2)과 평균 족저압(mean plantar pressure, kPa)으로 설정하였으며, 발의 영역을 P1 엄지발가락, P2 기타 발가락, P3 전족부 내측, P4 전족부 외측, P5 중족부 내측, P6 종족부 외측, P7 후족부로 구분하여 분석하였다.

표본의 수가 30명이므로 정규성 검정(Shapiro-Wilk test)을 선행하였으며, 정규성 가정을 만족함에 따라 대응표본 t-검정(paired t-test)을 실시하여 조건 간의 통계적 유의성을 검증하였다. 유의수준(α)은 0.05로 설정하였다.

3. Results

3.1 Contact area

맞춤형 인솔 착용 시 전체 족저 접촉 면적은 미착용(기존 인솔) 시와 비교하여 약 15.2% 유의하게 증가하였다($p < 0.05$). 세부 영역별

로 살펴보면, 기존 방진화에서는 거의 접촉이 이루어지지 않던 내측 아치를 이루는 중족부 내측(P5) 부위의 접촉 면적이 약 65.5%로 크게 증가하였다($p < 0.01$) (Figure 4). 이는 맞춤형 인솔이 족궁의 빈 공간을 효과적으로 채워주어 발바닥과 지면 사이의 접촉을 증가시킨다는 것을 확인하였다.

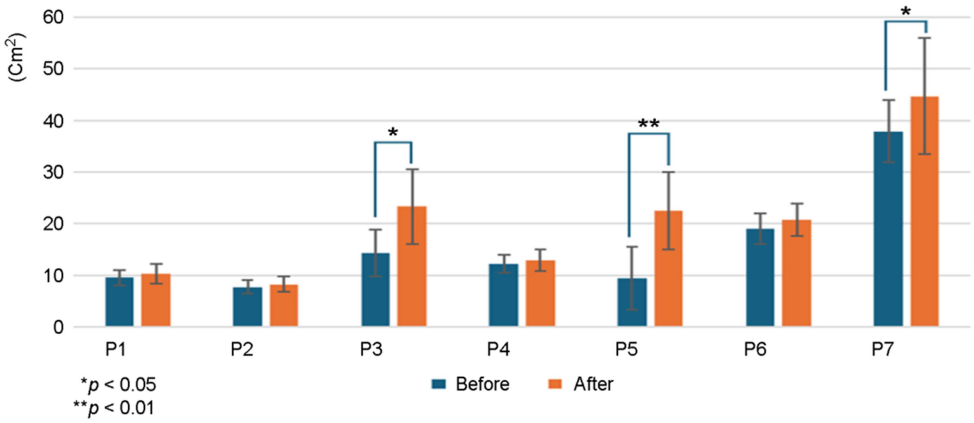


Figure 4. Comparison of contact area between safety shoes dustproofing and customized insole

3.2 Plantar pressure

족저압 분석 결과, 맞춤형 인솔 착용 시 전체 평균 압력은 약 23.1% 감소하는 경향을 보였다. 특히 통증 호소가 가장 잦았던 중족부 내측(P5) 부위와 뒤꿈치(P7) 부위의 압력이 가장 크게 감소되었다($p < 0.01$). 이는 증가된 접촉 면적으로 인해 체중 부하가 특정 부위에 집중되지 않고 발 전체로 고르게 분산되었기 때문이다(Figure 5).

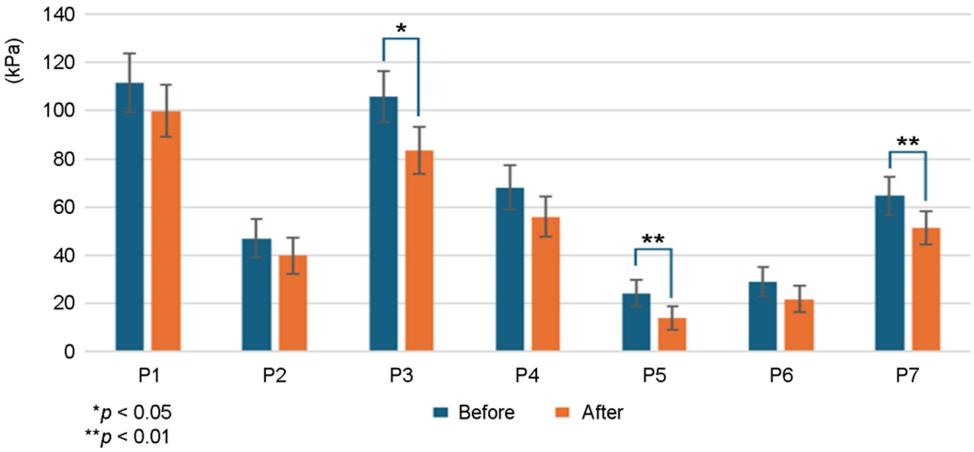


Figure 5. Comparison of plantar pressure between safety shoes dustproofing and customized insole

4. Discussion

본 연구는 반도체 FAB 입식 작업자의 하지 불편감을 개선하기 위해 맞춤형 인솔의 생체역학적 효과를 검증하였다. 연구 결과, 맞춤형

인솔의 적용은 기존 안전 방진화 대비 족저 접촉 면적을 유의하게 증가시키고, 국소 부위에 집중된 족저압을 효과적으로 분산시키는 것으로 나타났다. 첫째, 접촉 면적의 증가와 아치 지지 효과이다. 본 연구에서 가장 두드러진 변화는 중족부 내측 아치 영역의 접촉 면적 증가(65.5%)였다. 기존 선행 연구(Ryu et al., 2008)에서도 인솔의 형상이 족저압 분포에 미치는 영향을 규명한 바 있으며, 족궁 지지(arch support)가 보행 및 기립 시 발의 피로도를 낮추는 핵심 요인임을 강조하였다. 반도체 방진화는 바닥이 평평하고 딱딱하여 족궁을 전혀 지지하지 못하는 구조적 한계가 있다. 본 연구의 맞춤형 인솔은 이러한 족궁을 물리적으로 지지함으로써 체중 부하 면적을 넓혔고, 이는 족저압 감소로 직결되었다. 둘째, 족저압 분산을 통한 근골격계 부담 완화이다. Park (2010)의 연구에 따르면, 기능성 인솔의 착용은 하지 근육의 활성도를 조절하여 근피로를 감소시키는 긍정적인 효과가 있다. 본 연구에서도 전족부와 후족부에 집중되던 과도한 압력이 중족부(아치)로 분산되는 결과를 보였다. 이는 Lee et al. (2010)이 제시한 중창(midsole)의 역할과 일치하는 결과로, 맞춤형 인솔이 반도체 현장의 딱딱한 바닥(grating/access floor)으로부터 전달되는 지면 반발력을 효과적으로 흡수하고 분산시키는 완충 장치 역할을 수행했음을 시사한다. 셋째, 반도체 현장 적용성이다. 기존 택배 노동자 등을 대상으로 한 연구(Kim and Jin, 2023; Baek and Jeon, 2021)에서는 작업 부하 경감을 위해 제도적 개선이나 차량 구조 변경 등을 제안하였으나, 청정도가 최우선인 반도체 FAB에서는 설비나 바닥 구조를 변경하는 것이 현실적으로 불가능하다. 따라서 작업자가 착용하는 '신발 내부'를 개선하는 맞춤형 인솔은 현장 적용성이 매우 높은 현실적인 대안이 될 수 있다. 이는 고위험 직업군을 위한 스마트 안전 관리 시스템의 일환으로도 해석될 수 있다(Kim et al., 2019).

본 연구는 소수의 인원(N=30)을 대상으로 정적 자세에서의 효과만을 검증했다는 한계가 있다. 향후 연구에서는 보행 분석(gait analysis)을 포함한 동적 평가와, 실제 현장에서의 장기간 착용에 따른 근골격계질환 유병률 변화를 추적하는 종단 연구가 필요할 것이다.

5. Conclusion

본 연구는 반도체 FAB 내 입식 작업자를 대상으로 맞춤형 인솔 적용 시의 인간공학적 효과를 정량적으로 분석하였다. 결론적으로 맞춤형 인솔은 족저 접촉 면적을 확대하고 특정 부위의 압력 집중을 해소함으로써, 방진안전화의 구조적 단점을 보완하고 작업자의 신체적 부담을 경감시키는 유효한 중재 방안임이 확인되었다. 이는 향후 반도체 및 정밀 제조 산업 현장의 근골격계질환 예방 프로그램 수립 시 기초 자료로 활용될 수 있을 것이다.

References

Baek, H.J. and Jeon, Y.L., Labor of courier working hours and health problems, *Korea Institute of Industrial Safety and Health*, 30-35, 2021.

Kang, H.W., An, Y.L., Kim, D.Y., Lee, D.O., Park, G.Y. and Lee, D.Y., Assessment of Validity and Reliability of Plantar Pressure in Smart Insole, *Journal of Korean Foot and Ankle Society*, 26(3), 130-135, 2022.

Kim, H.Y. and Jin, S.E., A Quantitative Investigation of the Workload in the Delivery Worker, *Journal of Ergonomics Society of Korea*, 42(1), 29-37, 2023.

Kim, M.J. and Choi, E.S., Occupational Accident Compensation Insurance Coverage and Occupational Accidents for Special-type Delivery Workers, *Korean Academy of Community Health Nursing*, 32(1), 64-72, 2021.

Kim, S.Y., Hwang, I.C., Kim, D.S., Moon, B.M. and Oh, S.Y., A Study on IoT/ICT Convergence Smart Safety Management System for Safety of High Risk Workers, *Journal of the Society of Disaster Information*, 15(1), 39-48, 2019.

Korea Occupational Safety and Health Agency (KOSHA)., Guidelines for Safety and Health in Cleanrooms (KOSHA Guide). Ulsan: KOSHA, 2023.

Lee, J.I., Lee, H.T. and Kim, Y.J., The Study of the Mid-sole Wedge of Pronated Group on Maximum Force and Foot Pressure, *Korean Journal of Applied Biomechanics*, 20(3), 337-344, 2010.

Lin, R.T. and Chan, C.C., Effectiveness of workstation design on reducing musculoskeletal risk factors and symptoms among semiconductor fabrication room workers, *International Journal of Industrial Ergonomics*, 37(1), 35-42, 2007.

NIOSH, Work practice guide for manual lifting. *NIOSH technical report*, US Department of Health and Human Services, 1981.

Oh, M.H., Lee, J.H., Kwon, Y.J., Lee, J.D., Lee, M.H. and Kim, K., Effect of Heel-heights of Insole on Balance in Healthy Adults, *Journal of the Korean Society of Physical Medicine*, 4(2), 79-86, 2009.

Park, H., Koo, B.H., Park, J.H. and Kim, J.Y., Foot Pressure Mat with Visual Notification for Recognizing and Correcting Foot Pressure Imbalance, *Journal of Fashion Business*, 28(1), 83-97, 2024.

Park, H.Y., Kim, S.Y., Jung, S.J. and Seo, S.B., Changes in the use of domestic courier services due to the spread of COVID-19, *The Korea Spatial Planning Review (or Transportation Research)*, 28(2), 51-66, 2021.

Park, J.Y., The analysis of muscle activities on the lower limb during wearing functional insole, *Korean Journal of Applied Biomechanics*, 20(3), 327-336, 2010.

Ryu, T., Chae, B., Lim, W., Choi, H.S. and Chung, M.K., Effects of Rear-Foot Wedged Insoles on the Foot Pressure in Walking, *Journal of the Korean Institute of Industrial Engineers*, 34(1), 90-97, 2008.

Author listings

Su In Park: kntvs5@gmail.com
Highest degree: Hankyong National University, Graduate School, Anseong
Position title: PhD Student, Department of Social Safety Systems Engineering, Hankyong National University
Areas of interest: WMSDs, Human Factors, Safety

Kyung Jun Kang: kangkyungjun88@gmail.com
Highest degree: Ph.D., Department of Chemistry, Korea Advanced Institute of Science and Technology (KAIST)
Position title: Senior Professional, Giheung EHS team, Foundry Business, Samsung electronics
Areas of interest: Chemistry, Chemical Safety

Jae Hee Park: maro@hknu.ac.kr
Highest degree: Ph.D., Department of Industrial Engineering, KAIST
Position title: Professor, Department of Social Safety Systems Engineering, Hankyong National University
Areas of interest: Chair, WMSDs, Human Error